

30-0014/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

30-0014(001)

Grundlagenversuche in NH_4SCN -Lösung
nach der IfBt- und FIP-Richtlinie

von

J. Erdmann
J. Neisecke
F.S. Rostásy

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Das Forschungsvorhaben wurde unter Aktenzeichen IV/1-5-216/79
vom Institut für Bautechnik, Berlin, gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines
2. Versuchsdurchführung
 - 2.1. Versuchsanordnung und Prüfeinrichtung
 - 2.2. Prü fzelle
 - 2.3. Prü flösung
 - 2.4. Probenvorber eitung
 - 2.5. Probenmaterial
3. Versuchsergebnisse
4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen
5. Schrifttum
6. Anlagen

1. Allgemeines

Zur Ermittlung der Empfindlichkeit von Spannstählen gegenüber wasserstoffinduziertem Spröbruch infolge kathodischer Wasserstoffbeladung werden Laborversuche durchgeführt, in denen die unter konstanter Zugbeanspruchung stehenden Proben der Einwirkung einer wäßrigen Ammoniumthiocyanat-Lösung unter freien Korrosionsbedingungen ausgesetzt werden. Die während der Versuche gemessene Zeitdauer bis zum Bruch, die sogenannte Standzeit, wird zur vergleichenden Beurteilung der Beständigkeit der Spannstähle gegenüber wasserstoffinduziertem Spröbruch herangezogen.

In der Bundesrepublik Deutschland und in den anderen westeuropäischen Staaten, wie Niederlande, Belgien, Frankreich, Spanien usw. wurden Prüfrichtlinien mit genauen Angaben zur Prüfungsdurchführung aufgestellt, um die Prüfstreuungen zu verringern und um vor allem eine Vergleichbarkeit der in den verschiedenen Institutionen ermittelten Prüfergebnisse zu erreichen. In der Bundesrepublik Deutschland wurden die Prüfbedingungen für Korrosionsversuche vom Institut für Bautechnik (IfBt), Berlin, in Zusammenarbeit mit den Prüfstellen und Spannstahlherstellern erarbeitet. Die Fassung der vorläufigen IfBt-Richtlinie für die Korrosionsversuche an Spannstählen (Stand: Juli 1978) [1] weicht allerdings in einigen Prüfparametern vom entsprechenden Entwurf des FIP-ad hoc-Ausschusses Nr. 7 (FIP-Richtlinie mit Stand vom 14. März 1978) [2] der anderen westeuropäischen Staaten ab. Die Unterschiede zwischen der IfBt- und FIP-Richtlinie für den Korrosionsversuch in Ammoniumthiocyanat-Lösung sind aus Tafel 1 zu ersehen. Die wesentlichsten Unterschiede zwischen den beiden Richtlinien bestehen in der Prüftemperatur, der freien Prüflänge und vor allem in der fehlenden Prüflösungsumwälzung in der FIP-Richtlinie.

FIP = Fédération Internationale de la Précontrainte

Tafel 1: Vergleich der Prüfbedingungen für Korrosionsversuche in Ammoniumthiocyanat-Lösung

Prüfparameter	IfBt-Richtlinie	FIP-Richtlinie
Prüflösung	20 %ige NH_4SCN -Lösung.	20 %ige NH_4SCN -Lösung.
Prüftemperatur	$(318 \pm 1)\text{K}$	$(323 \pm 1)\text{K}$
Umwälzung der Prüflösung	ja	nein
Umwälzgeschw. i.d. Prüfzelle	Prüfzellenvol./min	-
Prüfkraft	$(0,80 - 0,016)F_m$	$(0,80 \pm 0,016)F_m$
Prüflänge in der Lösung	$\geq 300 \text{ mm}$	$\geq 200 \text{ mm}$

Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, mit den Ergebnissen vergleichender Korrosionsprüfungen nach der IfBt- und FIP-Richtlinie eine Entscheidungshilfe für die Beantwortung der Frage zu erhalten, ob die FIP-Richtlinie für die Korrosionsprüfung von Spannstählen in der Bundesrepublik Deutschland zu übernehmen oder ob aufgrund empirischer Daten die IfBt-Richtlinie in modifizierter Fassung beizubehalten ist.

2. Versuchsdurchführung

2.1. Versuchsanordnung und Prüfeinrichtung

Für die Korrosionsprüfungen werden unter konstanter Zugbeanspruchung stehende Spannstahlproben verwendet. Bei diesem Versuchsaufbau liegt zu Versuchsbeginn in der Probe ein einachsiger Hauptspannungszustand vor, allerdings nicht mehr nach der Entstehung von Rissen oder Kerben. Die mechanische Zugbelastung der Spanndrähte erfolgte in selbstgebauten Prüfmaschinen. Eine Prüfmaschine besteht aus einem verwindungsfreien Rahmen, der aus breiten I-Trägern zusammengeschweißt ist. Durch den Ober- und Unterholm des Rahmens

wird jeweils eine Zugstange geführt, an deren Ende an der Rahmeninnenseite ein Spannkopf zur Aufnahme der Probenverankerung aufgeschraubt ist. Über die aus dem Oberholm herausragende obere Zugstange ist ein der jeweiligen maximalen Prüfkraft angepaßtes Tellerfederpaket geschoben. Durch entsprechende Tellerfeder-Kombinationen können Federkennlinien erzeugt werden, die bei Längenänderung der Probe während des Versuches nur einen sehr geringen Prüfkraftabfall zulassen. Über die aus dem Unterholm herausragende untere Zugstange ist ein Hydrohohlkolbenzylinder geschoben, der mit einer Sechskantmutter über die Zugstange gegen den Unterholm gespannt ist. Mit dem Hydrozylinder wird die Prüflast über eine Handpumpe hydraulisch aufgebracht. Durch eine zwischen Tellerfederpaket und Oberholm eingebaute Kraftmeßdose läßt sich die Zugkraft während des Spannvorganges und der Versuchsdauer kontrollieren und eine erforderliche Zugkraftkorrektur überwachen. Die Zugspannung betrug bei allen durchgeführten Versuchen 80 % der Ist-Zugfestigkeit der einzelnen Spannstahlprobe.

Vor der Verankerung der Spannstahlprobe mittels zwei- bzw. dreiteiliger Klemmkeile mit Gehäuse in den Spannköpfen wird die zylindrisch angeordnete Prü fzelle über die Probe geschoben. Nach dem Aufbringen der Prüflast wird die Prü fzelle in ihrer Sollage arretiert und die Öffnungen zwischen Prü fzelle und Spannstahl abgedichtet. Die Abdichtung erfolgt mit durchbohrten Silikonstopfen.

Vor dem Versuchsbeginn befindet sich die Prüflösung in einer Vorratsflasche, die in einem elektronisch geregelten Badthermostaten steht. Dieser Thermostat erwärmt die frisch angesetzte Prüflösung und temperiert sie im Falle der IfBt-Korrosionsprüfung auch während des Versuches. Parallel dazu wird das Wasser des Badthermostaten durch die Heizschlauchwicklungen der Prü fzelle gepumpt. Vor Beginn eines jeden Versuches wird stets die Prü fzelle durch die Heizschlauchwicklungen vorgewärmt. Dadurch wird erreicht, daß beim Einfüllen

der Prüflösung in die Prü fzelle (Versuchsbeginn) keine Temperaturerniedrigung eintritt. Da die Heizschlauchwicklungen der Prü fzelle einen Wärmeverlust der Prü flösung praktisch verhindern, ergibt sich über den gesamten Versuchszeitraum eine sehr gute Temperaturkonstanz. Während eines IfBt-Korrosionsversuches wird die Prü flösung durch eine Umwälzpumpe aus korrosionsbeständigem austenitischen Cr-Ni-Mo-Stahl, die in die Prü flösung in der Vorratsflasche eintaucht, zwischen Vorratsflasche und Prü fzelle ständig umgepumpt.

Bei einer Prüfung nach der FIP-Richtlinie wird die erwärmte Prü flösung von Hand aus der Vorratsflasche in die Prü fzelle gegossen. Nach dem Einfüllen wird in den Verschlußstopfen der Einfüllöffnung ein Gärröhrchen eingesetzt, das ein Entweichen von Luftbläschen aus der verschlossenen Prü fzelle während des Versuches ermöglicht. Die Temperierung erfolgt dann allein durch die vom Heizwasser durchströmten Schlauchwicklungen der Prü fzelle, die auch in diesem Fall für sehr gute Temperaturkonstanz sorgen. Wegen der gleichmäßigen Durchwärmung der Prü fzellenwandung ist zudem in der Prü flösung keine nennenswerte Strömung infolge Konvektion zu erwarten. Bei einer FIP-Korrosionsprüfung kann für das Füllen der Prü fzelle mit Prü flösung natürlich auch die Umwälzpumpe benutzt werden, die nach erfolgtem Füllen einfach abgeschaltet wird. Für eine derartige Verfahrensweise wird jedoch eine größere Prü flösungsmenge benötigt, weshalb bei den FIP-Versuchen aus Wirtschaftlichkeitsgründen in der zuvor beschriebenen Weise verfahren wurde.

Der besondere Vorteil der vorgestellten Versuchsanordnung liegt - bedingt durch die Verwendung von Prü fzellen mit Heizschlauchwicklungen - vor allem in der Möglichkeit, ohne irgendwelche Umbauten sowohl nach der IfBt- als auch nach der FIP-Richtlinie prüfen zu können. Dabei werden in jedem Fall hinsichtlich Last- und Temperaturkonstanz geringere Toleranzwerte eingehalten, als die Richtlinien vorschreiben. Abb. 1 zeigt eine vollständige Prü feinheit.



Abb. 1: Korrosionsprüfmaschine mit eingebauter Spannstahlprobe und Prüfzelle sowie Zusatzeinrichtungen: Badthermostat mit Vorratsflasche und eintauchender Umwälzpumpe, Durchflußmesser, Meßbrücke für eingebaute Kraftmeßdose

2.2. Prüfzelle

Für eine vergleichende Versuchsreihe nach der IfBt- und der FIP-Richtlinie wurde aus Gründen der direkten Vergleichbarkeit stets dieselbe Prüfzelle verwendet. Aus Anlage 1 sind der Aufbau und die Abmessungen des verwendeten Prüfzellentyps zu ersehen, der einen radialen Prüflösungszu- und -ablauf besitzt. Die Prüfzelle (Abb. 2) ist aus einem ultra-hochmolekularen Niederdruck-Polyäthylen (Handelsbezeichnung: Supralen RCH 1000/DIN-Bezeichnung: UHM-PE) gefertigt, das im Temperaturbereich von 13 bis 358 K verwendbar ist. Der Werkstoff besitzt eine breite Chemikalienbeständigkeit, nimmt kein Wasser auf und ist außerordentlich verschleiß- und abriebfest. Er ist ohne Schwierigkeiten spanabhebend zu bearbeiten. Die hohe Lösungsmittelbeständigkeit des Supralen RCH 1000

erlaubt nur Klebeverbindungen mit Haft- und Zweikomponentenklebern, an deren Festigkeit jedoch keine hohen Anforderungen gestellt werden können. Wegen seiner hohen Schmelzviskosität kann dieses Polyäthylen nur durch Reib- oder Stumpfschweißen gefügt werden, wobei diese Arbeitsgänge einen bestimmten apparativen Aufwand und eingehende Erfahrungen voraussetzen.

In der hier vorgestellten Konstruktion wurden die Einzelteile durch Verschrauben bei gleichzeitigem Kleben verbunden. Wegen des schwierigen Klebens und Schweißens dieses Werkstoffes mußte in dieser Konstruktion auf eine Doppelmantelausführung des zylindrischen Prüfczellenteils verzichtet werden. Stattdessen befindet sich an der Prüfczellenaußenwandung eine Heizschlauchwicklung, die - vom Heizwasser des angeschlossenen Badthermostaten durchströmt - den Elektrolyten in der Prüfczelle temperiert.

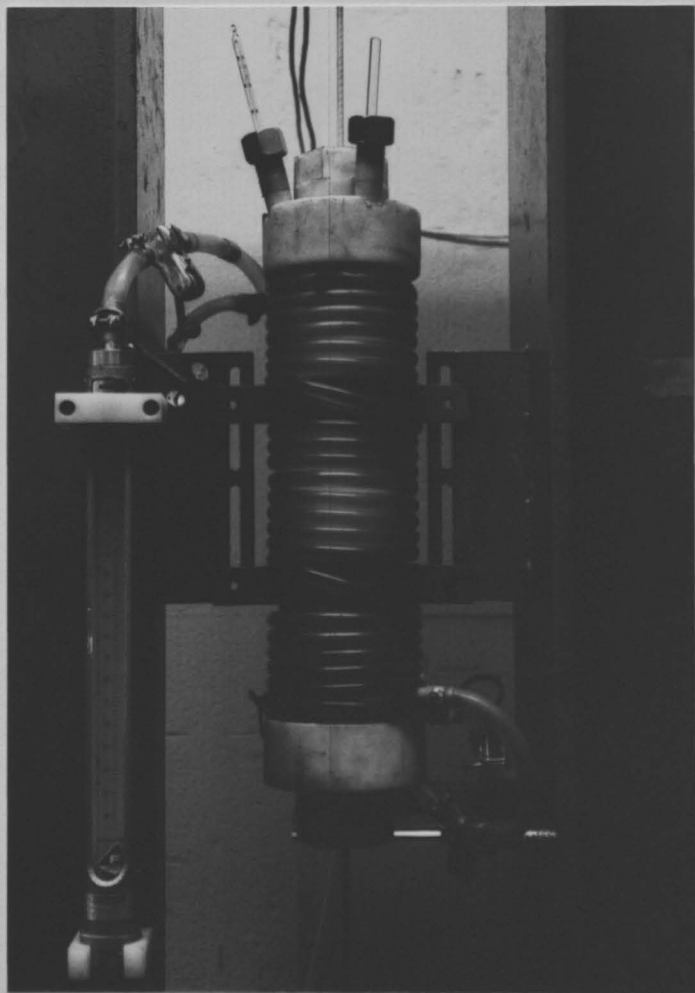


Abb. 2:

Polyäthylen-Prüfczelle
mit Heizschlauchwicklung

In dem Arbeitsplan dieses Forschungsvorhabens sind auch Korrosionsversuche in einem Prüfzellentyp aus Cr-Ni-Mo-Stahl mit tangentialen Prüflösungszu- und -ablauf enthalten. Durch die Verwendung von zwei verschiedenen Prüfzellentypen mit unterschiedlichem Prüflösungszu- und -ablauf sollte der Einfluß unterschiedlicher Strömungsbedingungen auf die Standzeiten erfaßt werden. Der Einsatz der Stahlprüfzelle scheiterte jedoch daran, daß sich während des Korrosionsversuches der verwendete Cr-Ni-Mo-Stahl gegenüber der strömenden 20 %igen NH_4SCN -Prüflösung bei 318 K als nicht korrosionsbeständig erwies, obwohl vor dem geplanten Bau dieser Stahlprüfzelle umfangreiche Vorversuche durchgeführt worden waren, um einen korrosionsbeständigen Konstruktionswerkstoff aus der industriellen Angebotspalette für die gegebenen Versuchsbedingungen auszuwählen. Erste Versuche mit vorhandenen Prüfzellen aus dem Cr-Ni-Stahl X 10 CrNiTi 18 9 (Werkstoff-Nr. 1.4541), die für die IfBt-Korrosionsversuche in 55 %iger $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung bei 323 K verwendet werden, zeigten nach 48 stündiger Versuchsdauer die nach der Literatur [3, 4, 5] zu erwartende große Abtragsrate dieses Werkstoffes in strömender Ammoniumthiocyanat-Lösung. Für den Bau eines neu konstruierten Stahlprüfzellentyps (Anlage 2) wurde nach umfangreichem Literaturstudium der Cr-Ni-Mo-Stahl X 5 CrNiMo 17 13 (Werkstoff-Nr. 1.4439) als Konstruktionswerkstoff ausgewählt. Dieser Stahl enthält neben 17 % Cr und 14 % Ni einen relativ hohen Mo-Gehalt von 4,3 %, wodurch unter den vorliegenden Versuchsbedingungen ein stabiles Passivverhalten und damit ein Ausschluß von Lochfraßkorrosion zu erwarten war. Dann stellte sich jedoch die Schwierigkeit ein, daß die für den Bau der neuen Prüfzelle benötigten Halbzeuge in der gewählten Stahlqualität im Handel nicht zu erhalten waren. Es war lediglich möglich, die notwendigen Halbzeuge aus der Stahlqualität X 10 CrNiMoTi 18 10 (Werkstoff-Nr. 1.4571) zu erhalten. Dieser Stahl enthält

im Mittel neben 17 % Cr und 12 % Ni nur einen Mo-Gehalt von 2,1 % und weist deshalb unter den vorliegenden Versuchsbedingungen nach Literaturangabe [6] eine deutliche Lochfraßkorrosionsneigung auf. Um eine Entscheidung hinsichtlich der Verwendung der Stahlqualität 1.4571 fällen zu können, waren eigene Versuche zur Überprüfung der Lochfraßneigung des Werkstoffes angezeigt. Es wurden Versuche an Blechstreifen in ruhender 20 %iger NH_4SCN -Lösung bei Raumtemperatur und bei 323 K durchgeführt, wobei die Prüflösung einmal täglich durch Schütteln durchmischt wurde. Da die Blechstreifen nach einer Prüfdauer von anderthalb Monaten keine Anzeichen von Lochfraß zeigten, wurden die benötigten Halbzeuge ersatzweise aus der Stahlqualität 1.4571 verwendet.

Bei den ersten Versuchen mit der neuen Prü fzelle zeigte der eingeschweißte Nippel des Ober- und Unterdeckels nach einer Versuchsdauer von etwa 100 h außerhalb der Schweißnaht katastrophalen Lochfraß, während der zylindrische Prü fzellenteil keinen Korrosionsangriff aufwies. Die korrodierten Nippel mußten daher ausgedreht und durch neue aus dem Stahl X 2 NiCrMoCu 25 20 2 ersetzt werden. Dieser Stahl wurde als Vollrundstab \varnothing 60 aus Schweden bezogen und enthält im Mittel neben 25 % Ni und 19,5 % Cr einen Mo-Gehalt von 4,5 %, der unter den vorhandenen Versuchsbedingungen eine Stabilität dieses Stahles gegenüber Lochfraßkorrosion versprach. Nach erneuten Versuchen mit der Prü fzelle wiesen die Innenseiten von Ober- und Unterdeckel nach etwa 200 stündiger Versuchsdauer starke Lochfraßkorrosion auf, während der neue ausgetauschte Nippel und die zugehörige Schweißnaht sowie der zylindrische Prü fzellenteil nicht angegriffen worden waren. Bei diesem Kenntnisstand wurden die beschriebenen Versuche im Hinblick auf die Verwendung der neuen Stahlprü fzelle zunächst abgebrochen, da das Ende des vorgegebenen Bearbeitungszeitraumes für das Forschungsvorhaben erreicht war.

Bei allen Vorversuchen mit der neuen Stahlprüfzelle (Abb. 3), die wie zuvor beschrieben während der Prüfdauer eine Schädigung durch Lochfraßkorrosion erfuhr,

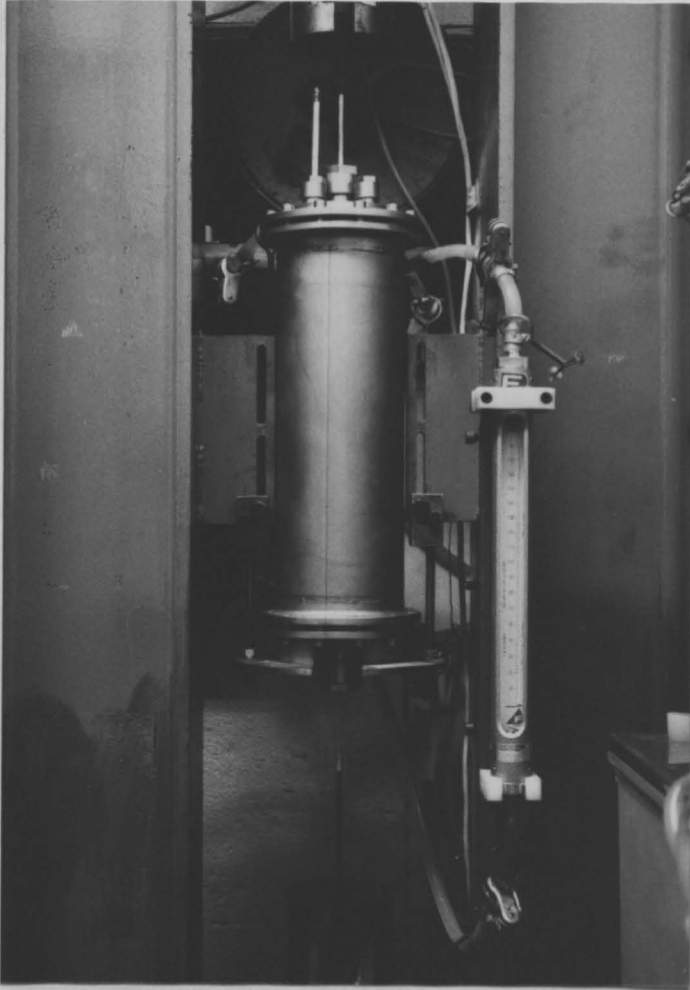


Abb. 3:

Neu entwickelte Prüfzelle aus Ni-Cr-Mo-Stahl mit Doppelmantel

riß keine der gespannten Spannstahlproben. Es wurde damit stets der Standzeit-Maximalwert von vergleichbaren IfBt-Korrosionsprüfungen an der gleichen Spannstahlsorte in der Polyäthylen-Prüfzelle überschritten. Die ausgebauten Spannstahlproben wiesen im Gegensatz zu den Prüfungen in der Polyäthylen-Prüfzelle auf der Oberfläche einen hellbraunen Niederschlag auf, der sich offenbar aus Bestandteilen des korrosiven Abtrages der Prüfzelle zusammensetzte. Dieser Niederschlag bildete praktisch eine "Schutzschicht", die die Geschwindigkeit der Phasengrenz- und Diffusionsreaktionen an der Spannstahloberfläche beeinflusste. Die

Standzeiten wurden zu längeren Zeiten verschoben und eine höhere Beständigkeit des Spannstahles gegenüber wasserstoffinduziertem Sprödbbruch vorgetäuscht.

2.3. Prüflösung

Als Prüflösung diente eine wäßrige 20 %ige Ammoniumthiocyanat-Lösung [1, 2]. Diese Lösung wirkt als schwach saure, aber stark pH-gepufferte Lösung, wobei das Thiocyanat-Anion offenbar als Promotor der Wasserstoffversprödung wirkt. Bei allen Korrosionsprüfungen nach der IfBt-Richtlinie wurde der Elektrolyt während der Versuchsdauer ständig zwischen Vorratsflasche und Prüfzelle umgepumpt. Die theoretische mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Prüfzelle betrug $\bar{w} = 5 \text{ mm s}^{-1}$, deren genaue Kontrolle ein im Prüflösungszulauf eingebauter Glaskonus-Schwebekörper-Durchflußmesser ermöglichte. Die Versuchstemperatur betrug bei allen IfBt-Prüfungen 318 K und bei allen FIP-Prüfungen mit ruhendem Elektrolyten 323 K.

Am Ende eines jeden Korrosionsversuches wurde stets der gesamte Prüflösungskreislauf bestehend aus Prüfzelle, Durchflußmesser, Vorratsflasche und Silikonschlauchleitungen mit Pril^R bzw. Ata^R gründlich gereinigt, anschließend mit dest. Wasser durchgespült und dann getrocknet.

2.4. Probenvorbereitung

Die Korrosionsproben wurden mit einem Winkelschleifer abgelängt, dabei standen die angelieferten Materialien als Draht- und Litzencoils sowie als Stangenmaterial zur Verfügung. Die jeweils an eine Korrosionsprobe angrenzenden Proben wurden stets als Zugproben verwendet. Aus den gemessenen Zugkräften dieser beiden Proben wurde durch Mittelwertbildung die maximale Zugkraft F_m der Korrosionsprobe bestimmt. Die Korrosionsproben wurden vor dem Versuch

mit Trichloräthylen entfettet und gesäubert und die Oberfläche anschließend einer Sichtkontrolle auf Beschädigungen mit dem bloßen Auge unterzogen. Es wurde dabei bewußt auf die Verwendung einer Lupe oder eines Mikroskopes verzichtet, da die Oberflächenkontrolle des Spannstahls in der Praxis ebenfalls ohne diese Hilfsmittel erfolgt. Um der Korrosionslösung eine definierte freie Prüflänge von 300 mm auszusetzen, wurde die restliche Probenoberfläche im Bereich der Prüfzelle bis zu den Durchführungs dichtungen mit einem Flüssigkunststoff abgedeckt.

In Anlage 3 sind die wichtigsten technischen Daten zur Versuchsdurchführung tabellarisch zusammengestellt.

2.5. Probenmaterial

Für die vergleichenden Korrosionsprüfungen wurden aus dem industriellen Spannstahlangebot die nach Herstellungsart, Festigkeitsklasse, Durchmesser und Querschnittsform marktgängigsten Spannstahlorten als Versuchsmaterial ausgewählt. Zusätzlich wurden in diese Materialauswahl zwei Sorten des kaltgezogenen Spannstahles St 1470/1670 - Ø 7,0 - rund, glatt aufgenommen, die auch dem Institut für Bauingenieurwesen der TU München und dem Otto-Graf-Institut der Universität Stuttgart für entsprechende Korrosionsversuche zur Verfügung standen. In das Untersuchungsprogramm wurde außerdem eine vergütete Spannstahlorte St 1420/1570 - Ø 12,2 - rund, glatt einbezogen, die aus einem Schadensfall stammte und vom Otto-Graf-Institut der Universität Stuttgart bereitgestellt worden war. Die in das Untersuchungsprogramm aufgenommenen Spannstahlorten, deren chemische Zusammensetzung und mechanische Kennwerte sind den Tabellen 1, 2 und 3 zu entnehmen.

Zeile	Spannstahlsorte		Querschnitts- form	Durchmesser in mm					Relaxationsklasse	Hersteller bzw. Lieferant	Bemerkung	
	Herstellungsart	Festigkeits- klasse										
1	vergütet	St 1420/1570	rund-glatt			7,0			-	Fried. Krupp Hüttenwerke AG, Werk Rheinhausen		
2							12,2		-			
3							12,2		-	Material eines Schadensfalles, Universität Stuttgart		
4	kaltgezogen	St 1375/1570					12,2		-	Thyssen Draht AG, Hamm		
5		St 1470/1670				7,0			-	Nederlandse Draadindustrie NDI BV, Venlo-Blerick	Sorte A	
6						7,0			-		Sorte B	
7				St 1570/1770	rund-profiliert		6,0				-	Klöckner Draht GmbH, Hamm
8		5,0								-		
9		7-dräht. Litze							12,5	no		

Tabelle 1: Verwendete Spannstahlarten im IfBt- und FIP-Korrosionsversuch

Zeile	Spannstahlsorte		Durchmesser in mm					Richtanalyse in Massen-%								Bemerkung
	Herstellungsart	Festigkeits- klasse						C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Cu	
1	vergütet	St 1420/1570			7,0			0,40	1,40	0,40			0,20		max.	
2						12,2		bis 0,60	bis 1,80	bis 0,80			bis 0,60		0,15	
3						12,2		0,45	1,63	0,59	0,014	0,021	0,57	0,017	-	+))
4	kaltgezogen	St 1375/1570				12,2										
5		St 1470/1670			7,0			0,70	0,10	0,50						
6					7,0											
7								bis	bis	bis						
8				6,0												
9		St 1570/1770	5,0					0,90	0,35	0,90						
							12,5									

+) Stückeranalyse der Spannstahlsorte aus einem Schadensfall

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Spannstahlsorten

Spannstahlsorte		Querschnitts- form	Relaxationsklasse	Nenn- durch- messer d in mm	0,01 %- Dehngrenze $R_{po,01}$ in N·mm ⁻²	0,2 %- Dehngrenze $R_{po,2}$ in N·mm ⁻²	Zug- festigkeit R_m in N·mm ⁻²	Gleichmaß- dehnung A_g in %	Bruch- dehnung A_{10} in %	Bruchein- schnürung Z in %	Streck- grenzen- verhältnis $\frac{R_{po,2}}{R_m}$
Herstellungsart	Festigkeits- klasse										
vergütet	St 1420/1570	rund-glatt	-	7,0	1.161	1.461	1.576	2,7	7,5	46	0,93
			-	12,2	1.304	1.446	1.594	4	9	47	0,91
			-	12,2	1.216	1.497	1.619	2,9	7,5	49	0,92
kaltgezogen	St 1375/1570		-	12,2	1.241	1.515	1.657	2,5	6	21	0,91
	St 1470/1670		-	7,0	1.345	1.533	1.735	4,2	8,5	38	0,88
			-	7,0	1.309	1.512	1.732	3,9	8	39	0,87
			St 1570/1770	rund-profiliert	-	6,0	1.297	1.666	1.827	2,1	7
	-	5,0			1.385	1.598	1.782	2	8,5	40	0,90
	7-dräht. Litze	no	12,5	1.400	1.677	1.826	-	-	-	0,92	

abelle 3: Mechanische Kennwerte der verwendeten Spannstahlsorten

3. Versuchsergebnisse

In den ursprünglichen Versuchsprogrammen des Forschungsvorhabens waren für jede Spannstahlsorte jeweils nur drei vergleichende Korrosionsprüfungen nach den beiden Richtlinien vorgesehen. Die Standzeitwerte dieser drei Korrosionsversuche zeigten jedoch eine so große Streuung, daß es aus Gründen der Aussagesicherheit richtiger erschien, mindestens die doppelte Anzahl an Korrosionsversuchen durchzuführen.

In den Tabellen 4 und 5 sind die gemessenen Standzeiten verschiedener Spannstahlorten unter statischer Zugbeanspruchung in 20 %iger Ammoniumthiocyanat-Lösung bei den IfBt- und FIP-Prüfbedingungen zusammengestellt. Die einzelnen Meßergebnisse sind den Anlagen 4 bis 20 zu entnehmen. Die Standzeiten wurden den Richtlinien entsprechend unter freien Korrosionsbedingungen, d. h. ohne äußere Polarisation ermittelt.

Die Ergebnisse, die in den Abbildungen 4 und 5 zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit auch noch grafisch dargestellt sind, werden in Form zwei verschiedener Mittelwerte angegeben. Für die Darstellung der Meßwerte erscheint im vorliegenden Fall der Zentralwert (Median) am sinnvollsten (Tab. 4), da er die zentrale Tendenz einer schiefen Verteilung und einer Verteilung mit Ausreißerwerten besser als jeder andere Mittelwert wiedergibt [7]. Außerdem kann der Zentralwert auch dann bestimmt werden, wenn die Endintervalle einer Verteilung nach unten und/oder oben offen sind (Zeile 1 in Tab. 4 und 5). Demgegenüber ist der arithmetische Mittelwert der beste Mittelwert für normale und annähernd normale Werteverteilungen. In seiner Eigenschaft stützt sich der arithmetische Mittelwert auf alle Meßwerte, wobei jede Änderung eines einzelnen Meßwertes seine Veränderung bewirkt. In den Zentralwert geht hingegen nicht die zahlenmäßige Größe aller Einzelwerte ein, sondern lediglich deren Rangordnung. Für das Problem der Ordnungsrelation zwischen dem

arithmetischen Mittelwert \bar{t} und dem Zentralwert \tilde{t} gelten die Beziehungen:

$\bar{t} > \tilde{t}$ für linksschiefe Werteverteilung

$\bar{t} < \tilde{t}$ für rechtsschiefe Werteverteilung

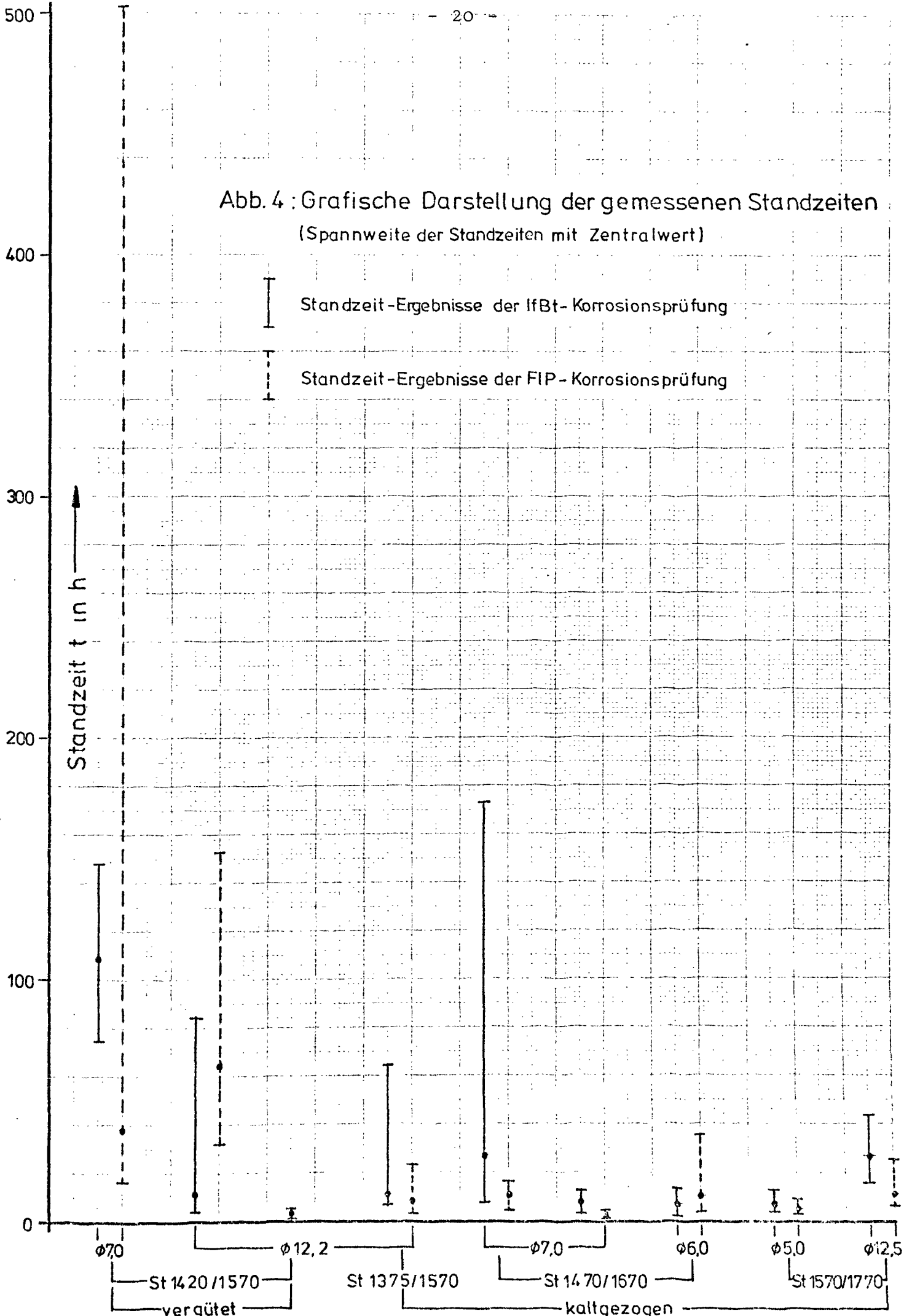
$\bar{t} = \tilde{t}$ für symmetrische Werteverteilung
(Normalverteilung)

Ein Vergleich der entsprechenden Mittelwerte der IfBt- und FIP-Prüfungen unter Verwendung der obigen Beziehungen zeigt an, daß praktisch nur links- und rechtsschiefe Verteilungen vorliegen, weshalb bei dieser Ergebnisdarstellung die Verwendung des Zentralwertes gerechtfertigt ist. Zum Vergleich wird auch der arithmetische Mittelwert der Meßreihen angegeben, der bisher für die Meßwertdarstellung von Korrosionsprüfungen üblich ist.

Eine eingehende Betrachtung der Meßwerte ergibt nun, daß bei den kaltgezogenen Spannstahlsorten die Standzeiten der IfBt-Korrosionsprüfungen in der Tendenz um den 1,3- bis 2,5 fachen Wert länger sind als die Standzeiten der entsprechenden FIP-Prüfungen. Bei den vergüteten Spannstählen deutet sich hingegen eine gegenläufige Tendenz an, die Standzeiten der FIP-Versuche scheinen länger als die Standzeiten der IfBt-Versuche zu sein. Es läßt sich jedoch wegen der geringen Anzahl vergüteter Spannstahlsorten im Versuchsprogramm und wegen der relativ großen Meßwertstrebungen in dieser Hinsicht für vergütete Spannstähle noch keine sichere Aussage machen. Als sicher kann dagegen gelten, daß die vergüteten Spannstahlsorten sowohl bei einer Prüfung nach der IfBt- als auch nach der FIP-Richtlinie grundsätzlich längere Standzeiten als die kaltgezogenen Sorten mit gleichem Durchmesser aufweisen. Eindeutig wird die hohe Empfindlichkeit des vergüteten Schadensmaterials gegenüber wasserstoffinduziertem Sprödebruch durch die gemessenen Standzeiten angezeigt. Die Meßwertstreuung der IfBt- und FIP-Versuche am gleichen Material ist bei den vergüteten und kaltgezogenen Spannstahlsorten etwa gleich groß. Auffällig ist aber der relativ große Absolutwert der Streuung der

Zeile	Festigkeits- klasse	Durchmesser in mm					Probenanzahl pro Versuchsreihe	Standzeit t in h			
								ermittelt nach			
								IfBt-	Richtlinie		FIP-
								Spannweite t _{min} bis t _{max}	Zentralwert t̄	Spannweite t _{min} bis t _{max}	Zentralwert t̄
1	St 1420/1570			7,0			7	74,3 bis 148,3	108,6	17,1 bis > 500,3	37,9
2					12,2		7	4,6 bis 84,35	10,9	32,1 bis 153,7	65,2
3					12,2		5	1,6 bis 4,9	3,15	—	—
4	St 1375/1570				12,2		7	7,1 bis 64,25	10,8	3,7 bis 23,0	8,4
5	St 1470/1670			7,0			7	8,0 bis 173,25	26,8	4,6 bis 17,1	10,75
6				7,0			8	3,1 bis 13,2	8,1	1,2 bis 5,0	3,45
7			6,0				7	3,0 bis 13,8	7,0	4,0 bis 35,5	10,4
8	St 1570/1770	5,0					7	4,6 bis 12,95	7,25	3,5 bis 9,3	5,2
9						12,5	6	17,05 bis 43,2	27,15	7,4 bis 25,2	11,7

Tabelle 4: Gemessene Standzeiten (Zentralwerte) im IfBt- und FIP-Korrosionsversuch



Angaben zur Spannstahlsorte

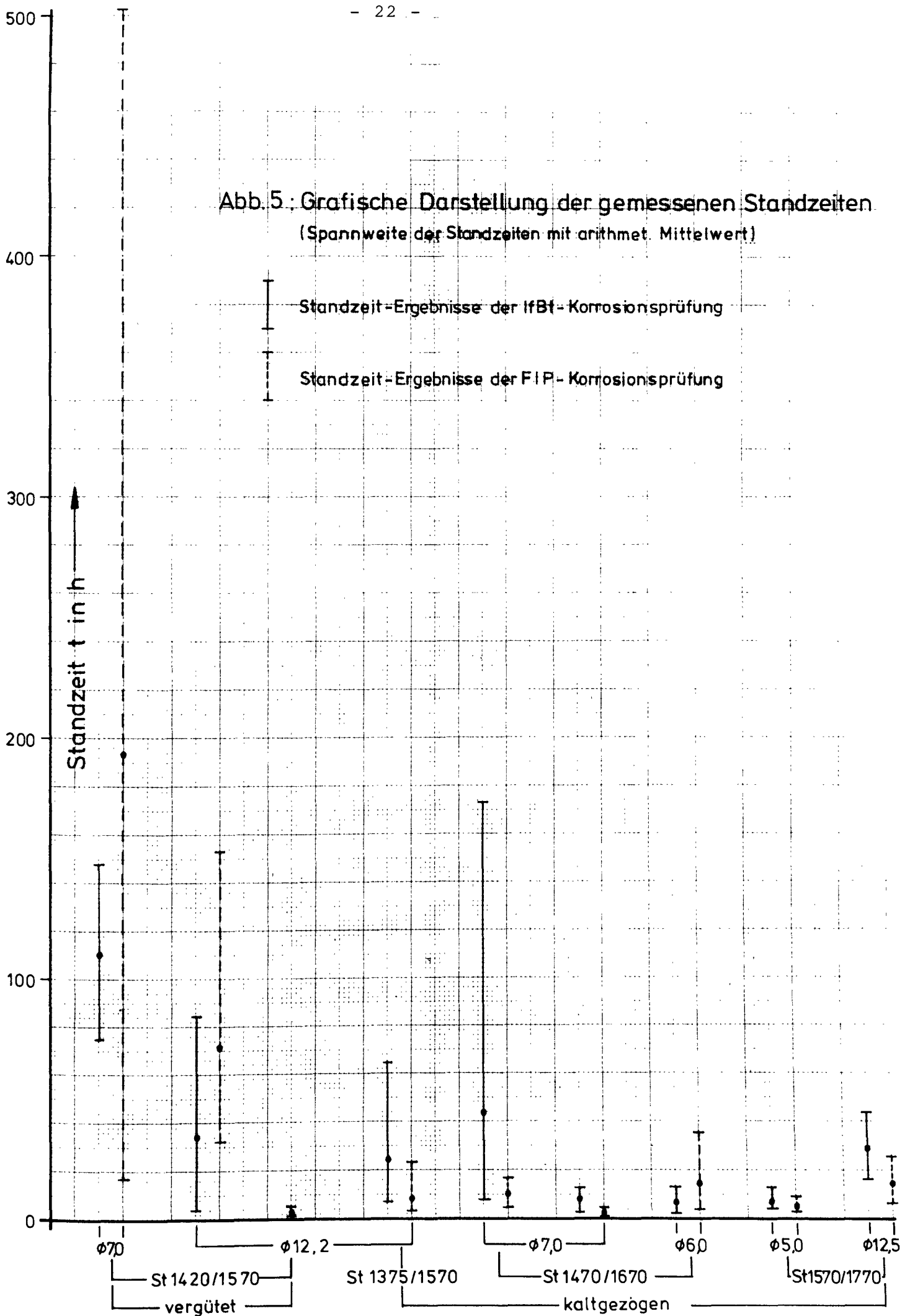
Zeile	Festigkeits- klasse	Durchmesser in mm					Probenanzahl pro Versuchsreihe	Standzeit t in h			
								ermittelt nach			
								IfBt- Spannweite t _{min} bis t _{max}	Richtlinie Mittelwert $\bar{t} \pm \Delta t$	FIP- Spannweite t _{min} bis t _{max}	Mittelwert $\bar{t} \pm \Delta t$
1	St 1420/1570			7,0			7	74,3 bis 148,3	112,00 \pm 11,25	17,1 bis > 500,3	(195,00 \pm 80,60) ⁺
2					12,2		7	4,6 bis 84,35	35,85 \pm 13,85	32,1 bis 153,7	73,25 \pm 15,10
3					12,2		5	1,6 bis 4,9	2,95 \pm 0,60	—————	—————
4	St 1375/1570				12,2		7	7,1 bis 64,25	24,90 \pm 9,85	3,7 bis 23,0	9,70 \pm 2,55
5	St 1470/1670			7,0			7	8,0 bis 173,25	44,25 \pm 21,80	4,6 bis 17,1	10,95 \pm 1,70
6				7,0			8	3,1 bis 13,2	7,95 \pm 1,25	1,2 bis 5,0	3,20 \pm 0,40
7			6,0				7	3,0 bis 13,8	7,60 \pm 1,50	4,0 bis 35,5	15,00 \pm 4,50
8	St 1570/1770	5,0					7	4,6 bis 12,95	8,55 \pm 1,40	3,5 bis 9,3	5,70 \pm 0,80
9						12,5	6	17,05 bis 43,2	28,90 \pm 4,35	7,4 bis 25,2	14,85 \pm 2,85

$(\bar{t} \pm \Delta t)$ = (Mittelwert \pm mittlerer Fehler des Mittelwertes)

⁺) Der Meßwert t > 500,3 h wurde bei der Mittelwertbildung als t = 500,3 h verwendet!

Tabelle 5: Gemessene Standzeiten (Mittelwerte) im IfBt- und FIP-Korrosionsversuch

Abb. 5: Grafische Darstellung der gemessenen Standzeiten
(Spannweite der Standzeiten mit arithmet. Mittelwert)



Angaben zur Spannstahlsorte

IfBt- und FIP-Versuchsreihen an vergüteten Spannstahl-sorten; die Streubreiten sind gegenüber den an kaltgezogenen Spannstahl-sorten gemessenen etwa um den Faktor 5 größer. Dieser Sachverhalt kann vielleicht mit Homogenitätsschwankungen in der Materialbeschaffenheit vergüteter Spannstähle erklärt werden, die eine Folge des spezifischen Herstellungsganges dieser Stähle sind. Die Auswirkungen der spezifischen Herstellungsparameter auf die Abmessungen (großer oder kleiner Durchmesser) und die Querschnittsformen (runder Draht oder 7-dräht. Litze) der Spannstahlerzeugnisse werden auch in den verschiedenen Streubreiten der an den kaltgezogenen Spannstahl-sorten gemessenen Standzeiten erkennbar.

In welcher Weise die Prüflösungsströmung auf die kathodische Reduktion des Korrosionsprozesses und damit in der Kette der Reaktionen bis zum Werkstoffkollaps auch auf die Standzeit von Einfluß ist, läßt sich aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht aussagen. Ein grundsätzlicher Einfluß der Prüflösungsströmung wird zwar anhand der Meßergebnisse sichtbar, jedoch zeigen die Standzeiten vergüteter und kaltgezogener Spannstahl-sorten eine gegenläufige Tendenz an (Abb. 4 und 5). Bezogen auf die vergleichenden FIP-Versuche erreichen kaltgezogene Spannstahl-sorten in strömender Prüflösung längere Standzeiten als die vergüteten Spannstähle. Der neusten technischen FIP-Literatur [8] sind keine vergleichenden Angaben zu entnehmen. Hier wird nur ganz allgemein darüber berichtet, daß die Standzeiten je nach Prüflabor zu- oder abnehmen.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Prüflösungstemperatur im IfBt- und FIP-Versuch auf die Probenstandzeit kann wegen der geringen Temperaturdifferenz zwischen den beiden Prüf-richtlinien von nur 5 grd in den Untersuchungen nicht nachgewiesen werden, zumal sich diesem Parameter in der Versuchsführung der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit beim

IfBt-Versuch noch überlagerte. Der exponentielle Zusammenhang zwischen der Stromdichte, die der Geschwindigkeitskonstante proportional ist, und dem Potential für den Fall einer elektrochemischen Durchtrittsreaktion ist analog der ARRHENIUS-Gleichung, die für eine chemische Reaktion die exponentielle Beziehung zwischen Reaktionsgeschwindigkeitskonstante und einem Energieterm ausdrückt. Die beiden analogen Ausdrücke sagen aus, daß sich $\ln i$ bzw. $\ln k$ linear mit $1/T$ ändert. Eine Temperaturerhöhung hat demnach eine Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit zur Folge, der bei den Korrosionsversuchen eine standzeitverkürzende Wirkung zuzuschreiben ist. Diese grundsätzliche Überlegung wird durch Ergebnisse aus FIP-Untersuchungen [8] bestätigt.

Untersuchungen von E. RIECKE [9] zum Bruchvorgang an Spannstählen ergaben, daß beim wasserstoffinduzierten Sprödbbruch wie bei anderen Brucharten die verschiedenen Phasen des Bruchvorganges in Rißbildung, stabiles Rißwachstum, Rißauslösung und instabile Rißausbreitung unterschieden werden können. Hinsichtlich der Rißbildung kann bei den Spannstählen davon ausgegangen werden, daß als Folge des Herstellungsprozesses eine größere Anzahl von Mikrorissen vorhanden ist. Neue Risse können im Zusammenwirken von Wasserstoff und Zugspannungen von mechanischen Verletzungen der Oberfläche, von Phasengrenzen, von Fremdausscheidungen an den Korngrenzen oder in der Matrix sowie von Versetzungsaufstauungen ausgehen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die charakteristische Bruchflächengestalt kaltgezogener und vergüteter Spannstahlarten, die infolge der Einwirkung einer 20 %igen Ammoniumthiocyanatlösung auf unter konstanter Zugkraft stehende Spannstahlproben auftrat. In Abb. 6 sind die beiden Bruchufer eines kaltgezogenen Spannstahles zu sehen. Die Bruchfläche, die zahlreiche zur Probenlängsachse parallele Risse enthält, weist ein stufenförmiges Aussehen auf. Deutlich ist die

a)

Abb. 6:

Stereomikroskopische
Aufnahmen beider
Bruchufer eines
kaltgezogenen Spann-
stahls St 1375/1570-
Ø 12,2-rund, glatt

FIP-Korrosionsprüfung
mit Standzeit $t=4,6$ h

a) und b) Rißausgang
an der Stahloberfläche

6:1

b)

Abb. 7:

Stereomikroskopische
Aufnahme des Bruch-
ufers eines vergüteten
Spannstahles
St 1420/1570-Ø 12,2-
rund, glatt

IfBt-Korrosionsprüfung
mit Standzeit $t=84,25$ h

Rißausgang an der
Stahloberfläche

6:1

a)

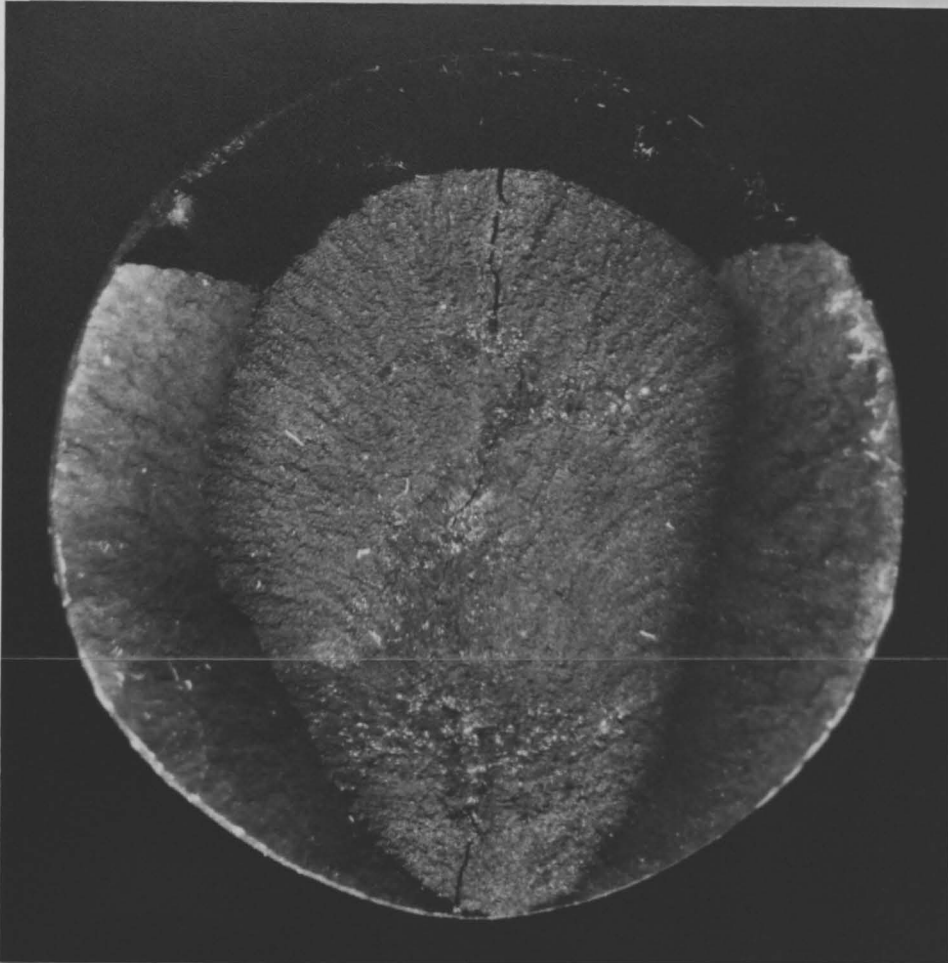


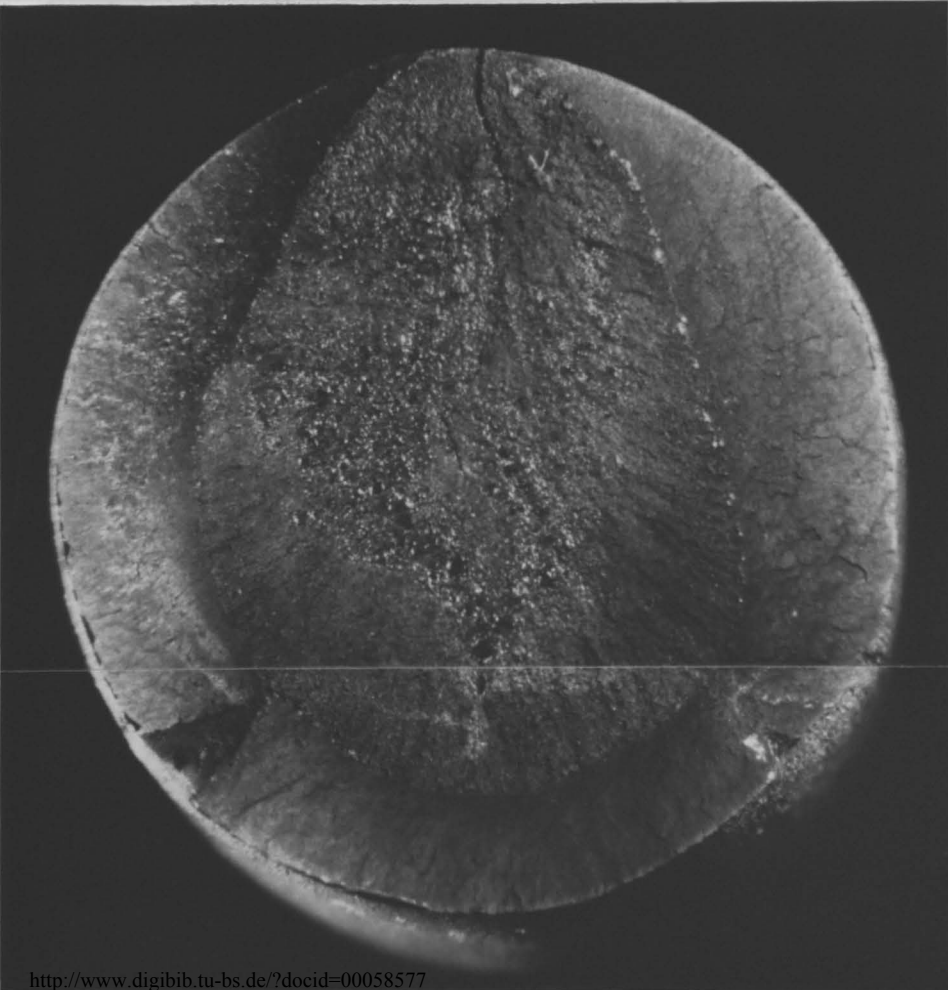
Abb. 8:

Stereomikroskopische
Aufnahmen beider
Bruchufer eines ver-
güteten Spannstahles
St 1420/1570- \emptyset 12,2-
rund, glatt

IfBt-Korrosionsprüfung
mit Standzeit $t=84,25$ h

a) und b) Rißausgang
an der Stahloberfläche

6:1



b)

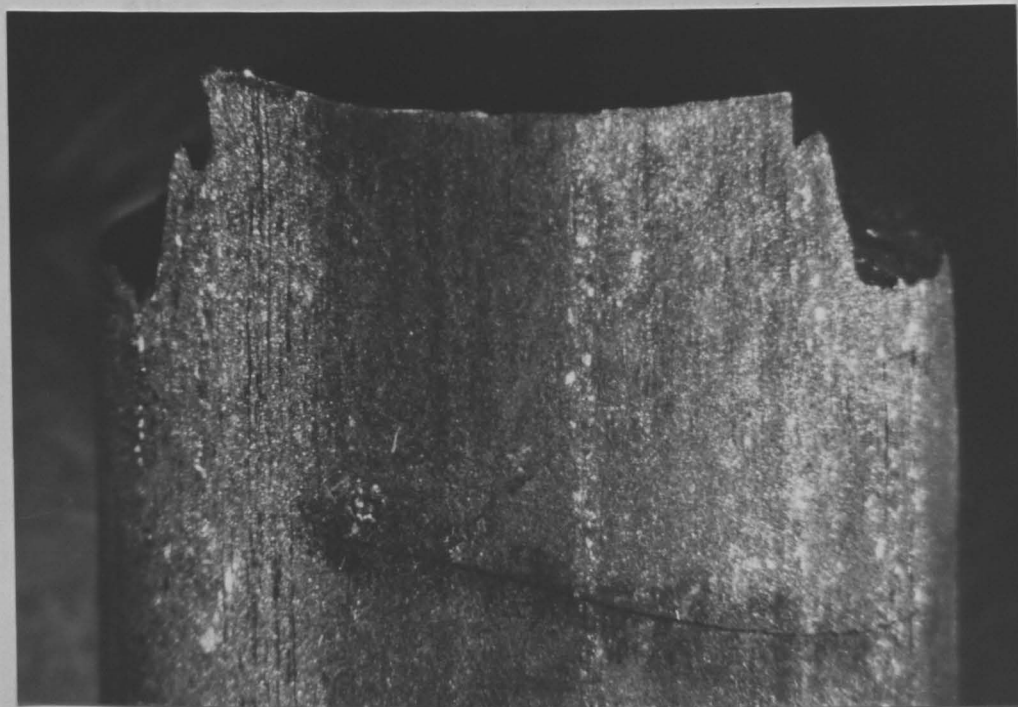
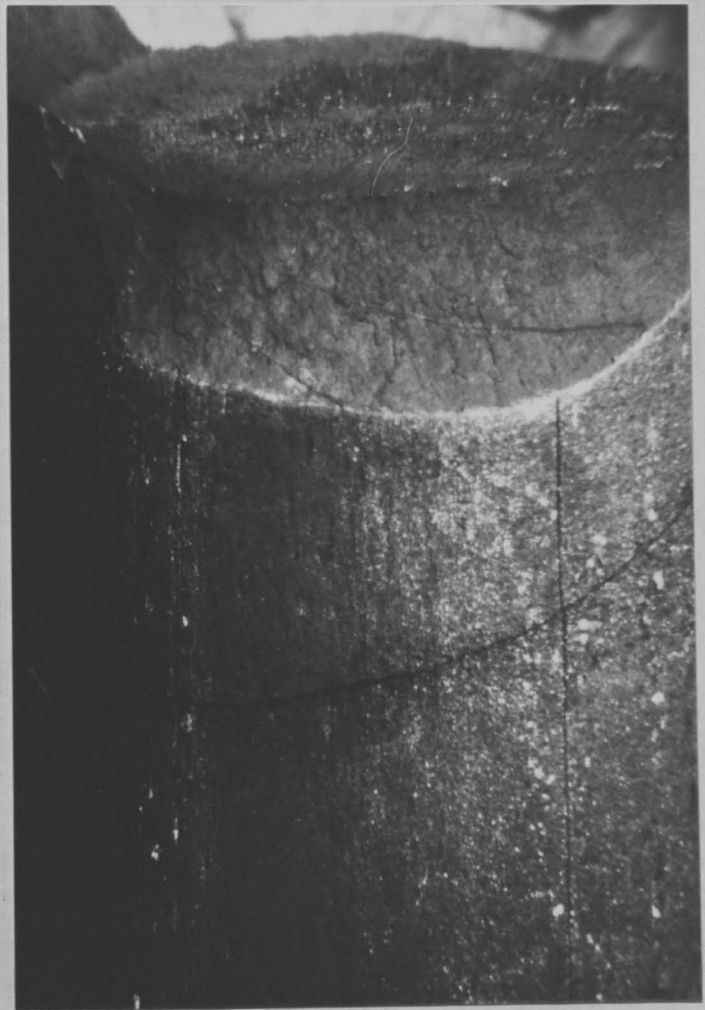


Abb. 9: Stereomikroskopische Aufnahmen eines vergüteten Spannstahls St 1420/1570-Ø 12,2-rund, glatt; IfBt-Korrosionsprüfung mit Standzeit $t = 84,25$ h

a), b) und c) zeigen das Ausmaß der Rißausbreitung über die Bruchfläche hinaus. Der Rißausgang ist Abb. 8b zu entnehmen.

Rißausgangsstelle, an der die Trennbruchfläche die Stahloberfläche berührt, zu erkennen. Auf dem restlichen Umfang ist die Normalspannungsbruchfläche von einer Scherlippe umgeben. Die Bruchflächen der Drähte und Stäbe aller kaltgezogenen Festigkeitsklassen, unabhängig vom Durchmesser und von der Querschnittsform - rund, glatte Ausführung, rund, profilierte Ausführung, 7-dräht. Litze - zeigten unter den gegebenen Prüfbedingungen dieses Aussehen. Bei den Drähten mit rund-profilierter Querschnittsform war der Rißausgang stets an den Flanken der eingewalzten Profilierung, also an einer Stelle hoher Spannungskonzentration, zu beobachten.

Die Abb. 7 und 8 zeigen zum Vergleich die Bruchufer eines vergüteten Spannstahls. Auch hier ist eindeutig anhand der Gestalt und der Struktur der Trennbruchfläche der Rißausgang an der Stahloberfläche zu identifizieren. Die Trennbruchfläche, die hier ebenfalls auf dem restlichen Probenumfang von einer Scherlippe umgeben ist, hat jedoch eine gänzlich andere makroskopische, nämlich "glattere" Bruchstruktur als die eines kaltgezogenen Spannstahles. Deshalb sind auch schon bei einer relativ geringen Vergrößerung die Rißverläufe auf dem Grund der Trennbruchfläche deutlich zu erkennen. Der wachstumsfähigste Riß hat sich bis zu einer Tiefe von 7 mm (\emptyset 12,2 mm) bzw. 4 mm (\emptyset 7,0 mm) in dem an das Bruchufer angrenzenden Werkstoff ausgebreitet (Abb. 9). Ein derartiger Rißverlauf wurde an kaltgezogenen Spannstahl-sorten nicht beobachtet. Die vergleichenden Korrosionsprüfungen nach der IfBt- und FIP-Richtlinie ergaben keinen Unterschied im makroskopischen Bruchflächenbild an kaltgezogenen oder vergüteten Spannstählen. Die Bruchorte waren über die freie Prüflänge statistisch verteilt.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die IfBt- und FIP-Richtlinie beinhalten die Modalitäten für die Prüfung der Empfindlichkeit von Spannstahl gegenüber wasserstoffinduziertem Spröbruch. Die beiden Prüfrichtlinien unterscheiden sich durch die freie Prüflänge, die Prüftemperatur und vor allem durch die fehlende Prüflösungsumwälzung in der FIP-Richtlinie.

Die Ergebnisse vergleichender Korrosionsprüfungen an verschiedenen Spannstahlsorten der IfBt- und FIP-Richtlinie sollen eine Entscheidungshilfe für die Frage liefern, ob die FIP-Richtlinie für die Prüfung von Spannstählen in der Bundesrepublik Deutschland zu übernehmen oder ob aufgrund empirischer Daten die IfBt-Richtlinie in modifizierter Fassung beizubehalten ist.

Die Liste der zu prüfenden Spannstahlsorten umfaßte die vergütete Festigkeitsklasse St 1420/1570 mit zwei Durchmessern und die kaltgezogenen Festigkeitsklassen St 1375/1570, St 1470/1670 und St 1570/1770 mit insgesamt fünf verschiedenen Durchmessern.

Die Prüfmethode bestand darin, unter konstanter Zugbeanspruchung stehende Spannstahlproben einer 20 %igen Ammoniumthiocyanat-Lösung unter Einhaltung der entsprechenden Prüfmodalitäten der IfBt- oder FIP-Richtlinie auszusetzen und unter den freien Korrosionsbedingungen die Zeitdauer bis zum Bruch, die sogenannte Standzeit, zu messen. Aus Gründen der Aussagesicherheit der Meßergebnisse wurden für jede Spannstahlorte mindestens 6 vergleichende Korrosionsprüfungen nach der IfBt- und FIP-Richtlinie durchgeführt.

Die Standzeiten der IfBt-Korrosionsprüfungen an kaltgezogenen Spannstahlsorten sind etwa um den 1,3- bis 2,5 fachen Wert länger als die Standzeiten der entsprechenden FIP-Prüfungen. Bei den vergüteten Spannstahlsorten deutet sich

eine umgekehrte Tendenz an; eine quantifizierte Aussage aufgrund der Meßreihen ist nicht möglich. In den Korrosionsversuchen nach beiden Richtlinien zeigen die vergüteten Spannstahlsorten grundsätzlich längere Standzeiten als die kaltgezogenen Sorten mit gleichem Durchmesser.

Die Meßwertstreuung der IfBt- und FIP-Versuche am gleichen Material ist bei den vergüteten und kaltgezogenen Spannstahlsorten von gleicher Größenordnung. Der Absolutwert der Streuung ist an vergüteten Spannstählen allerdings etwa um den Faktor 5 größer als an kaltgezogenen Spannstählen. Dieser Sachverhalt deutet möglicherweise auf Homogenitätsschwankungen der vergüteten Spannstahlerzeugnisse hin, die durch den spezifischen Herstellungsgang bedingt sind.

Läßt man die gegenläufigen Tendenzen einer Standzeitverlängerung bzw. -verkürzung kaltgezogener und vergüteter Spannstahlsorten bei einer kritischen Bewertung der vergleichenden IfBt- und FIP-Korrosionsversuche unberücksichtigt, so ist anhand der vorliegenden Meßergebnisse festzustellen, daß beide Prüfverfahren die gleiche Aussagekraft, das gleiche Differenzierungsvermögen und eine vergleichbare Streuung der Meßwerte aufweisen. Bei dieser Gleichwertigkeit beider Prüfverfahren ist als weiteres Kriterium notwendigerweise die Kostenfrage beider Verfahren zu erörtern. Der größere apparative Aufwand, bedingt durch die zusätzliche Umwälzpumpe, die Schlauchleitungen und den Durchflußmesser, und das größere Prüflösungsvolumen der IfBt-Korrosionsprüfung führen zwangsläufig zu höheren Prüfkosten gegenüber der FIP-Korrosionsprüfung. Der durchgeführte Vergleich kommt damit zu der Empfehlung, die Korrosionsprüfung zukünftig nach der FIP-Richtlinie für routinemäßige Zulassungs- und Überwachungsprüfungen vergüteter und kaltgezogener Spannstähle anzuwenden. Für Grundlagenversuche und wissenschaftliche Untersuchungen wird hingegen empfohlen, die Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie

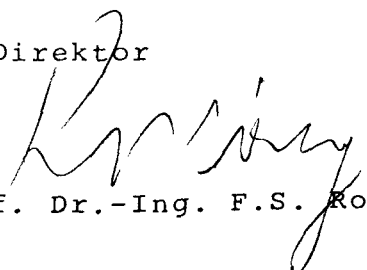
weiterhin zusätzlich zu verwenden. Wegen des strömenden Elektrolyten wird hier eine ständige Durchmischung der Prüflösung erreicht und damit die Ausbildung von Konzentrationsprofilen verhindert.

Die Korrosionsprüfung nach beiden Richtlinien ist prinzipiell geeignet, als Instrument der Produktionsüberwachung bei der Spannstahlfertigung eingesetzt zu werden. Die hier vorgelegten Ergebnisse zeigen ebenso wie Untersuchungen am Otto-Graf-Institut Stuttgart im allgemeinen sehr klare Unterschiede in der Werkstoff- und Oberflächenbeschaffenheit an. Um mit den aus einer gewissen Teilmenge, der Stichprobe, gewonnenen Ergebnissen mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit auf die Gesamtheit rückschließen zu können, muß aber mit Sicherheit der bisherige Stichprobenumfang von 3 auf ca. 10...15 Prüfungen erhöht werden. Für eine genauere Angabe des Stichprobenumfanges fehlt bisher noch die Versuchserfahrung. Im Zusammenhang mit der Bestimmung des Mittelwertes der Stichprobe muß zusätzlich zur Bewertung dieses Rechenwertes auch eine Aussage über die Lage und Größe des zugehörigen Streubandes gemacht werden. Außerdem wird vorgeschlagen, in den zuständigen Fachgremien zu erörtern, ob die Ergebnisse von Korrosionsprüfungen nicht durch die Angabe des Zentralwertes der Standzeiten vernünftiger als durch den arithmetischen Mittelwert beschrieben werden.

In den durchgeführten Vergleichsversuchen wurde eine Prüfzelle mit radialem Prüflösungszu- und -ablauf aus ultrahochmolekularem Niederdruck-Polyäthylen verwendet, mit deren Einsatz beste Erfahrungen gemacht wurden. Der verwendete Konstruktionswerkstoff besitzt eine breite Chemikalienbeständigkeit, nimmt kein Wasser auf und ist im Temperaturbereich von 13 bis 358 K verwendbar. Wegen des schwierigen Klebens und Schweißens dieses Werkstoffes, müssen bei seiner Verwendung einige konstruktive Zugeständnisse gemacht werden. In der Forschungsstelle wurde auch eine

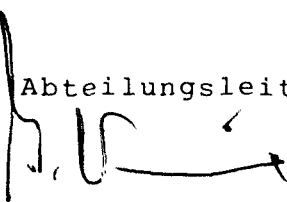
Prüfzelle mit tangentialem Prüflösungszu- und -ablauf aus Cr-Ni-Mo-Stahl entwickelt. Es waren umfangreiche Vorversuche erforderlich, um einen unter den chemischen, thermischen und hydrodynamischen Bedingungen in der Prüfzelle korrosionsbeständigen Stahl zu finden. Nach dem letzten Erkenntnisstand zeigt der Stahl X 2 NiCrMoCu 25 20 2 unter den herrschenden Versuchsbedingungen ein stabiles Passivverhalten und schließt damit Lochfraßkorrosion aus. Ein Kostenvergleich der beiden Konstruktionswerkstoffe unter Berücksichtigung der Dichten (das Niederdruck-Polyäthylen kostet 23,50 DM/kg ($\rho = 0,94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), der Ni-Cr-Mo-Stahl kostet 47,80 DM/kg ($\rho = 8,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)) fällt eindeutig zugunsten des Polyäthylen aus. Die Stahlkonstruktion einer Prüfzelle bietet allerdings gegenüber einer Polyäthylenkonstruktion optimale konstruktive Möglichkeiten und erlaubt auch den zusätzlichen Einsatz bei Temperaturen oberhalb 343 K. Die gleiche Einsatzbreite wie eine Edelstahlprüfzelle kann u. U. auch eine Prüfzelle aus kunststoffbeschichtetem Stahl bei einem geringeren Materialkostenanteil bieten. Unter den Prüfbedingungen der IfBt- und FIP-Richtlinie ist trotz einiger Verarbeitungsschwierigkeiten aufgrund der hier vorliegenden Prüferfahrung das ultra-hochmolekulare Niederdruck-Polyäthylen als Konstruktionswerkstoff für Prüfzellen zu empfehlen.

Der Direktor


(Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy)

Braunschweig, den 9.07.1981

Der Abteilungsleiter


(Dr.-Ing. J. Neisecke)

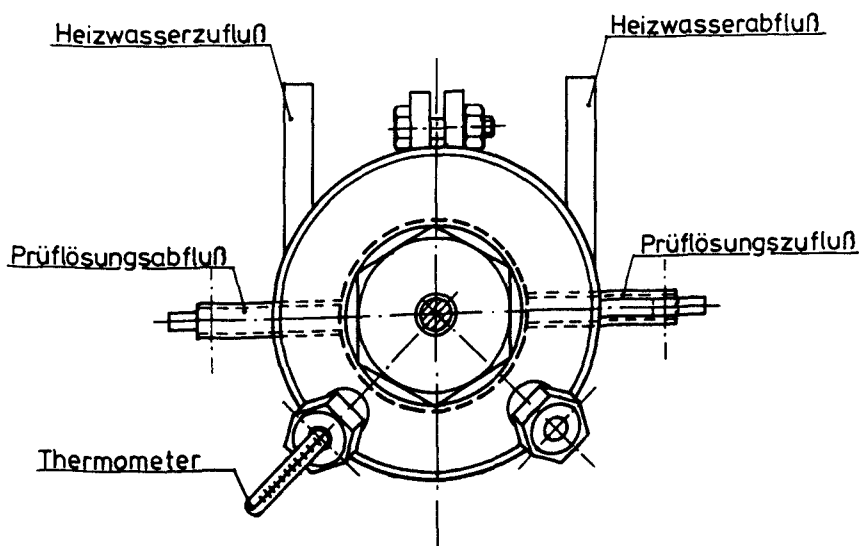
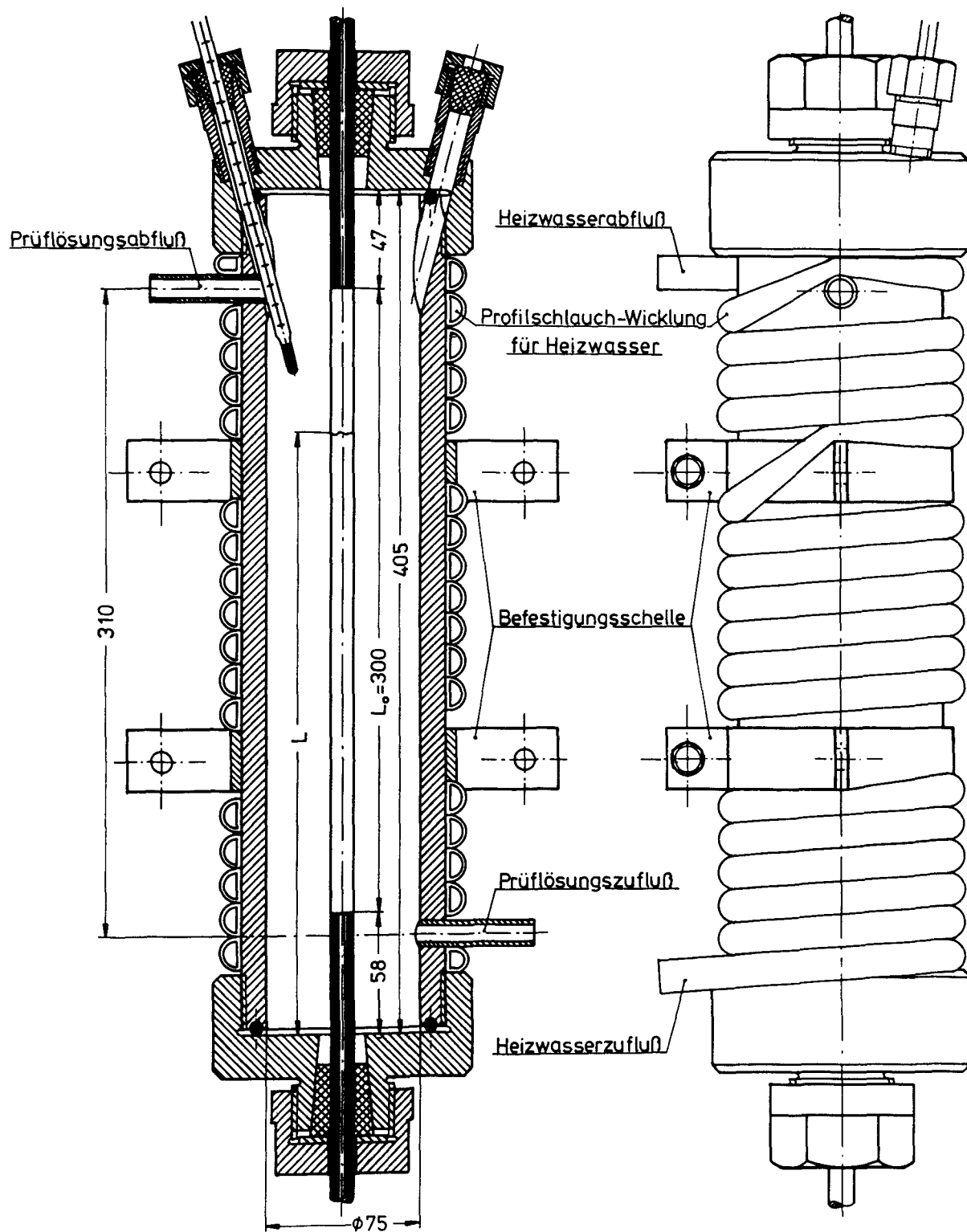
Der Sachbearbeiter


(Dipl.-Ing. J. Erdmann)

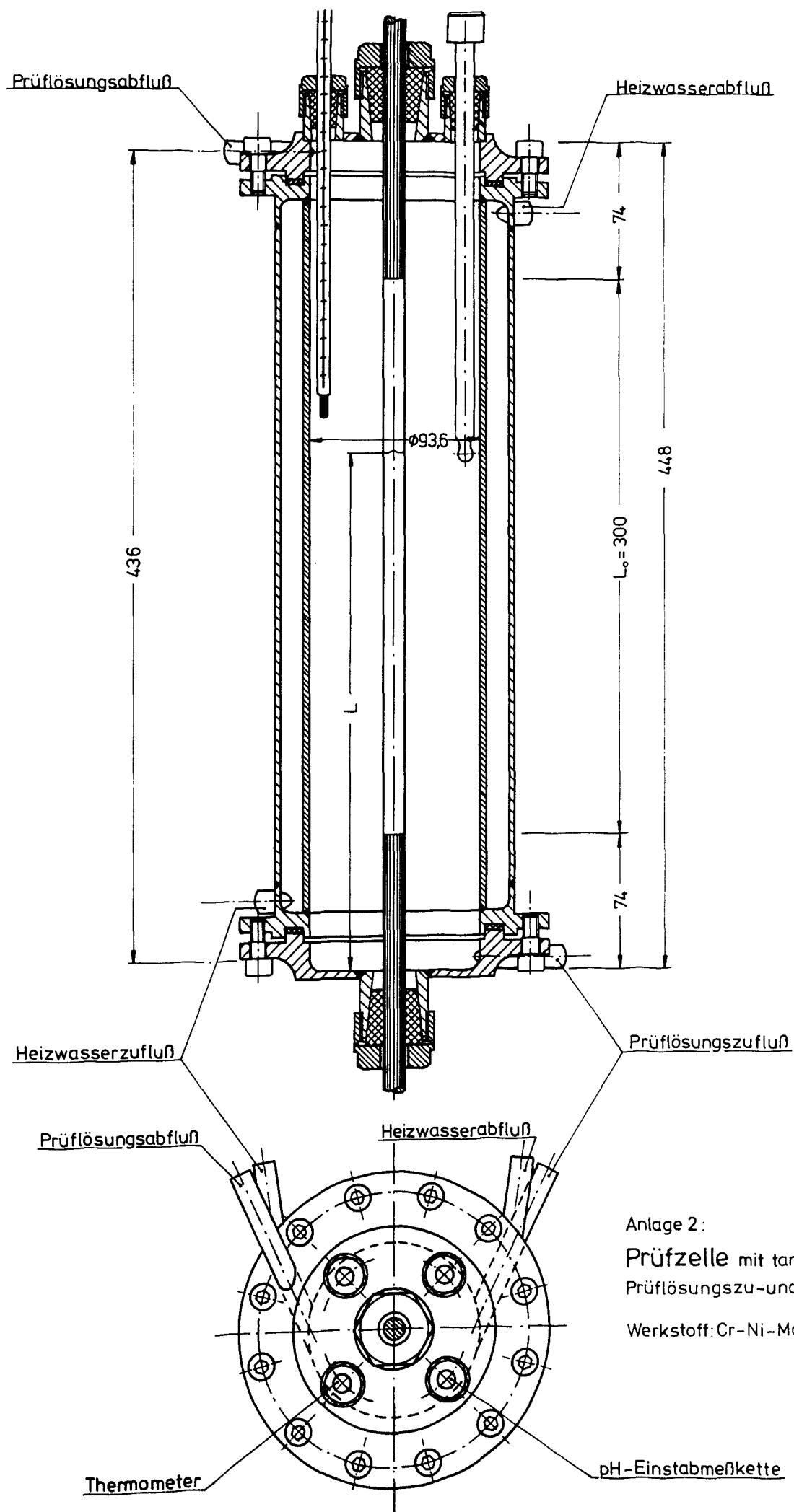
5. Schrifttum

1. Institut für Bautechnik: Richtlinien für die Zulassungs- und Überwachungsprüfungen an Spannstählen; Anlage 3: Vorläufige Fassung der Bestimmungen für die Durchführung von Spannungskorrosionsversuchen an Spannstählen (Juli 1978)
2. FIP Commission on Prestressing Steels and Systems, AD-HOC-COMMITTEE No. 7 "Stress Corrosion Tests", doc. 5-78. Ergebnisse der Sitzung vom 14. März 1978 in Paris
3. DECHEMA-Werkstoff-Tabelle; Lfd. Blatt-Nr. DWT 113 (September 1953)
4. E. Rabald: Corrosion Guide
Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1968)
5. Lexikon der Korrosion, Band 2
MANNESMANNRÖHREN-Werke (September 1970)
6. G. Schmitt, E.-L. Schmeling, B. Rothmann u. H.J. Schönfeld: Werkstoffe und Korrosion 29 (1978), 799/804
7. H. Lohse und R. Ludwig:
Statistik für Forschung und Beruf
Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/Main (1977)
8. Report on Prestressing Steel:
5. Stress corrosion cracking resistance test for prestressing tendons
Fédération Internationale de la Précontrainte (Sept. 1980)
9. E. Riecke: Archiv für das Eisenhüttenwesen 44 (1973)9, 647/656

6. Anlagen



Anlage 1:
Prüfzelle mit radialem
 Prüflösungszu- und-ablauf
 Werkstoff: Polyäthylen
 (UHM-PE)



Anlage 3: Technische Daten zur Versuchsdurchführung

a) Reinigungs- und

Entfettungsmittel.....: Trichloräthylen

b) Prüflösung

Gesamtvolumen.....: $V = 5.650 \text{ ml}$ (IfBt-Versuch)
 $V = 1.800 \text{ ml}$ (FIP-Versuch)

Zusammensetzung.....: 1.000 p angesetzte Lösung
enthalten bei $T = 295 \text{ K}$
200 p NH_4SCN in 800 p
destilliertem Wasser gelöst

Reinheitsgrad des
Ammoniumthiocyanates.....: min. 99 %

Hersteller des
Ammoniumthiocyanates.....: E. MERCK, Darmstadt
(Art.-Nr. 1213)

Prüflösungstemperatur.....: 318 K (IfBt-Versuch)
323 K (FIP-Versuch)

Prüflösungstemperatur-
Abweichungen.....: < 0,5 K durch elektronisch-
thermostatische Regelung

c) Polyäthylen-Prüfzelle

Prüfzellenvolumen.....: $V_0 = 1.800 \text{ ml}$
(Innenabmessungen: $\varnothing 75 \times 405 \text{ mm}$)

Umwälzpumpe.....: LAUDA-Eintauchumwälzpumpe
Typ ES 15/22

Prüflösungsführung.....: radiales Ein- und Ausströmen

Mittlere Strömungs-
geschwindigkeit in der
Prüfzelle (gemessen im
Zulauf).....: $\bar{w} = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (IfBt-Versuch)

Meßgerät.....: Glaskonus-Schwebekörper-
Durchflußmesser

Anlage 3 (Fortsetzung) Technische Daten zur Versuchsdurchführung

d) Prüfdurchführung

Probenanordnung in der
Prüfeinrichtung.....: senkrecht

Gesamtlänge der
Korrosionsprobe.....: $L_t = 1.030 \text{ mm}$ für $\varnothing \ 5,0 \dots 7,0 \text{ mm}$
 $L_t = 1.100 \text{ mm}$ für $\varnothing \ 12,2 \dots 12,5 \text{ mm}$

Prüflänge.....: $L_o = (300+2) \text{ mm}$

Beanspruchung der
Probe.....: einachsige Zugbeanspruchung


Zugkraft-Sollwert.....: $F_i = 0,8 F_m$

Zugkraft-Abweichung.....: $< 1 \%$ durch der Zugkraft optimal
angepaßte Tellerfederpakete und
durch kontinuierliche Nachregelung

Zugkraft-Erzeugung.....: durch Hydro-Zylinder innerhalb 5 min

Zugkraft-Messung.....: kontinuierlich, durch eingebaute
Kraftmeßdose mit angeschlossener
Meßbrücke

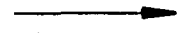
Zeit-Messung.....: durch elektrische Zeituhr mit
Ein- und Abschaltautomatik,
Ablesegenauigkeit: 0,05 h

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_t = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 	
					50	100
St 1420/1570 vergütet Ø 7,0 rund glatt (Hersteller: Fried. Krupp Hüttenwerke AG)	K 1.2	47,7	2,4	63	133,25	
	K 1.4	47,8	3,75	94	76,0	
	K 1.6	48,1	3,8	155	139,3	
	K 2.2	47,9	3,6	167	148,3	
	K 2.4	48,1	4,0	251	74,3	
	K 2.6	48,0	2,2	107	104,1	
	K 3.4	48,1	4,3	334	108,6	

Anlage 4: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 2 / Prüfmaschine Nr. 2)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_t = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in mm·m ⁻¹	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h →					
					100	200	300	400	500	
St 1420/1570 vergütet Ø 7,0 rund glatt (Hersteller: Fried. Krupp Hüttenwerke AG)	K 3.6	47,6	2,1	283	37,9					
	K 4.2	47,4	3,1	162	17,1					
	K 4.6	47,6	3,6	130	20,4					
	K 5.2	47,7	2,65	334	34,8					
	K 6.2	47,9	1,8	187				397,0		
	K 6.6	47,4	3,15	-						>500,3
	K 7.2	47,9	4,9	83				357,55		


Anlage 5: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 1 / Prüfmaschine Nr. 1 + 2)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i=0,8F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in mm·m ⁻¹	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 									
					10	20	30	40	50	60	70	80	90	
St 1420/1570 vergütet ø 12,2 rund glatt (Hersteller: Fried. Krupp Hüttenwerke AG)	K 4.1	147,6	1,85	90	56,9									
	K 5.1	149,8	1,6	205	4,6									
	K 5.3	150,0	1,4	148	10,9									
	K 11.2	149,8	1,8	139	7,2									
	K 11.4	149,9	1,4	61	6,8									
	K 16.2	150,4	2,2	195	84,35									
	K 16.4	150,4	2.15	112	80,3									


Anlage 6: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 1 / Prüfmaschine Nr. 1)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in mm·m ⁻¹	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h →
St 1420/1570 vergütet Ø 12,2 rund glatt (Hersteller: Fried. Krupp Hüttenwerke AG)	K 1.1	150,0	1,8	170	50 65,2
	K 1.3	150,0	1,3	207	51,5
	K 2.1	150,2	2,3	155	84,3
	K 2.5	150,4	1,5	272	153,7
	K 3.1	149,4	1,9	350	79,7
	K 3.3	149,3	1,5	318	46,1
	K 3.5	149,1	1,75	322	32,1

Anlage 7: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 1 / Prüfmaschine Nr. 1)

Festigkeitsklasse Herstellungstyp Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 				
					1	2	3	4	5
St 1420/1570 vergütet $\varnothing 12,2$ rund glatt (Lieferant: Universität Stuttgart)	N 1	152,4	0,6	134	3,3				
	N 2	152,4	1,95	139	1,8				
	N 3	152,4	1,1	145	3,15				
	N 4	152,4	1,85	227	4,9				
	N 5	152,4	0,9	106	1,6				


Anlage 8: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 1 / Prüfmaschine Nr. 1)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_t = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 					
					10	20	30	40	50	60
St 1375/1570 kaltgezogen $\varnothing 12,2$ rund glatt (Hersteller: Thyssen Draht AG)	TD 1.1	155,7	3,05	165	7,1					
	TD 1.3	156,7	3,1	185	10,8					
	TD 1.5	157,8	3,0	203	8,3					
	TD 2.1	155,3	3,3	192						61,6
	TD 2.3	156,6	2,9	184						64,25
	TD 2.5	157,8	3,0	196	13,8					
	TD 3.1	156,6	3,0	71	8,4					

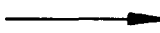
Anlage 9: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 1 / Prüfmaschine Nr. 1)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i=0,8F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in mm·m ⁻¹	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h →			
					5	10	15	20
St 1375/1570 kaltgezogen Ø 12,2 rund glatt (Hersteller: Thyssen Draht AG)	TD 4.1	152,0	4,2	138	13,3			
	TD 4.3	154,4	4,3	345	9,1			
	TD 4.5	156,8	3,0	69	5,7			
	TD 5.1	157,6	2,3	299	3,7			
	TD 5.3	156,0	3,3	67	4,6			
	TD 5.5	154,4	2,9	79	23,0			
	TD 6.1	155,4	2,6	262	8,4			


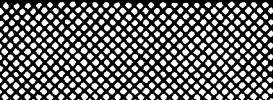
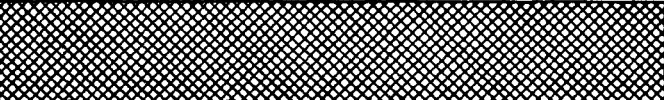
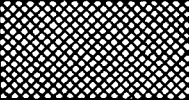
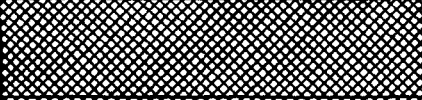
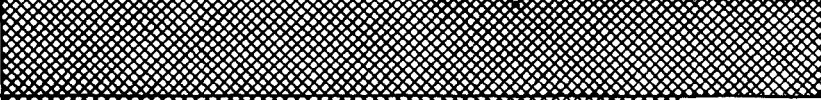
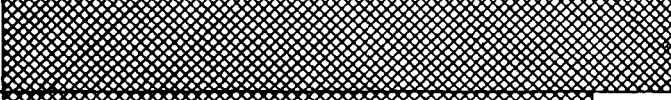
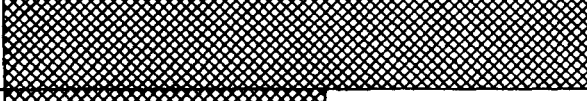
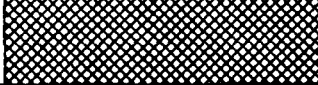
Anlage 10: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 1 / Prüfmaschine Nr. 1)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 					
					30	60	90	120	150	180
St 1470/1670 kaltgezogen $\varnothing 7,0$ rund glatt (Hersteller: Nederlandse Draadindustrie NDI BV; Sorte A)	A 72	52,7	1,4	206	26,8					
	A 73	52,5	6,0	328	8,0					
	A 75	52,6	5,5	58						173,25
	A 76	52,7	0,7	340	29,5					
	A 77	52,6	0,6	208	15,1					
	A 78	52,5	7,1	310	37,5					
	A 79	52,6	3,8	309	19,5					


Anlage 11: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 3 / Prüfmaschine Nr. 3)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 					
					3	6	9	12	15	18
St 1470/1670 kaltgezogen $\varnothing 7,0$ rund glatt (Hersteller: Nederlandse Draadindustrie NDI BV; Sorte A)	A 80	52,6	4,9	135	10,75					
	A 81	52,7	5,0	254	6,6					
	A 87	52,6	0,8	280	14,6					
	A-I2	52,3	6,9	247	4,6					
	A-J2	52,4	3,7	272	17,1					
	A-K2	52,4	6,0	65	13,5					
	A-L2	52,6	4,95	240	9,6					

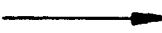
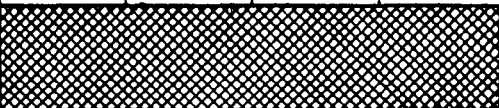
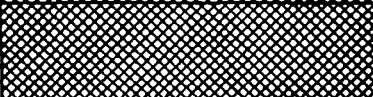
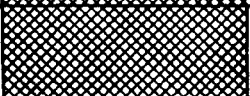
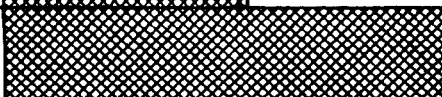
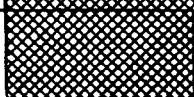
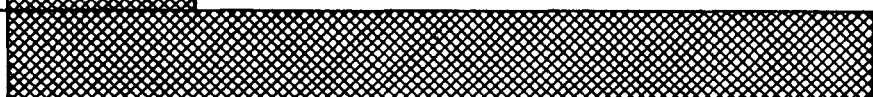
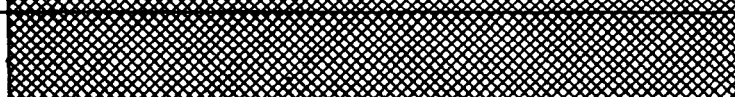
Anlage 12: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 3 / Prüfmaschine Nr. 3)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i=0,8F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in mm·m ⁻¹	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 									
					2	4	6	8	10	12	14			
St 1470/1670 kaltgezogen Ø 7,0 rund glatt (Hersteller: Nederlandse Draadindustrie NDI BV; Sorte B)	B 61.2	52,8	4,15	86					4,4					
	B 61.3	52,8	1,9	73							10,6			
	B 62.2	52,9	1,15	213			3,1							
	B 62.3	52,9	2,3	203					6,8					
	B 63.2	52,7	4,0	112									13,2	
	B 63.3	52,7	4,9	138							10,8			
	B 64.2	52,7	0,4	166							9,5			
	B 64.3	52,7	1,15	159				5,15						


Anlage 13: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 2 / Prüfmaschine Nr. 2)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nennendurchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_1 = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl.1.)	Standzeit t in h 				
					1	2	3	4	5
St 1470/1670 kaltgezogen $\varnothing 7,0$ rund glatt (Hersteller: Nederlandse Draadindustrie NDI BV; Sorte B)	B 65.2	52,9	2,3	298	5,0				
	B 65.3	52,9	3,2	290	1,8				
	B 66.2	52,7	5,5	181	3,35				
	B 66.3	52,7	5,7	72	3,6				
	B 67.2	52,9	4,9	175	3,6				
	B 67.3	52,9	5,95	270	3,2				
	B 68.2	52,9	4,0	358	12				
	B 68.3	52,9	5,55	182	3,9				


Anlage 14: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 3 / Prüfmaschine Nr. 3)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i=0,8F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in mm·m ⁻¹	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 						
					2	4	6	8	10	12	14
St 1470/1670 kaltgezogen Ø 6,0 rund profiliert (Hersteller: Klöckner Draht GmbH)	KD 84	41,5	4,15	68	 7,9						
	KD 86	41,4	0,65	195	 5,9						
	KD 88	41,7	1,7	248	 3,9						
	KD 92	40,9	0,35	146	 7,0						
	KD 90	41,6	0,35	183	 3,0						
	KD 94	40,6	0,25	350	 13,8						
	KD 96	41,0	2,3	64	 11,7						


Anlage 15: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 3 / Prüfmaschine Nr. 3)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenndurchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i=0,8F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 			
					10	20	30	40
St 1470/1670 kaltgezogen Ø 6,0 rund profiliert (Hersteller: Klöckner Draht GmbH)	KD 68	40,6	3,6	183	24,5			
	KD 70	41,2	4,3	68	35,5			
	KD 72	41,3	3,3	174	4,8			
	KD 74	41,6	2,7	183	6,2			
	KD 76	41,6	0,5	64	19,7			
	KD 78	41,0	0,5	83	4,0			
	KD 80	40,6	0,8	148	10,4			


Anlage 16: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 3 / Prüfmaschine Nr. 3)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenndurchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i=0,8F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 									
					2	4	6	8	10	12	14			
St 1570/1770 kaltgezogen ø 5,0 rund profiliert (Hersteller: Klöckner Draht GmbH)	KD 20	28,2	1,8	261	11,6									
	KD 22	28,1	0,5	98	4,8									
	KD 24	28,3	0,5	119	6,2									
	KD 26	28,2	0,8	252	4,6									
	KD 28	28,0	0,6	338	12,45									
	KD 30	28,2	1,8	169	7,25									
	KD 32	28,2	0,5	345	12,95									

Anlage 17: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 2 / Prüfmaschine Nr. 2)

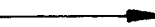
Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenn Durchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_i = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 					
					2	4	6	8	10	
St 1570/1770 kaltgezogen $\varnothing 5,0$ rund profiliert (Hersteller: Klöckner Draht GmbH)	KD 36	28,4	0,85	74	5,2					
	KD 38	28,4	0,8	323	3,5					
	KD 40	28,0	0,85	73	4,7					
	KD 42	28,0	1,25	352	9,3					
	KD 44	28,4	0,55	258	4,0					
	KD 46	28,4	0,25	68	5,2					
	KD 48	28,5	0,25	343	7,9					

Anlage 18: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 2 / Prüfmaschine Nr. 2)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenndurchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_1 = 0,8 F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Bruchort ⁺ L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 				
					10	20	30	40	50
St 1570/1770 kaltgezogen $\varnothing 12,5$ 7-dräht. Litze (Hersteller: Klöckner Draht GmbH)	KD 14	137,2	4,15	288	17,05				
	KD 16	137,1	2,8	73	19,2				
	KD 18	137,2	2,3	145/226	26,05				
	KD 20	137,1	0,6	253/285/288	43,2				
	KD 22	137,0	1,3	226/346	39,75				
	KD 24	136,7	1,4	255	28,3				

⁺) Bei mehreren Angaben sind die Bruchkoordinaten verschiedener Einzeldrähte angegeben

Anlage 19: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der IfBt-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 2 / Prüfmaschine Nr. 2)

Festigkeitsklasse Herstellungsart Nenndurchmesser Querschnittsform	Proben- bezeichnung	Zugkraft $F_1=0,8F_m$ in kN	Bogenstich (Durchbiegung) z in $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$	Bruchort ^{†)} L in mm (s. Anl. 1)	Standzeit t in h 				
					5	10	15	20	25
St 1570/1770 kaltgezogen Ø 12,5 7-dräht. Litze (Hersteller: Klöckner Draht GmbH)	KD 2	136,9	4,2	189/200	11,9				
	KD 4	136,2	2,2	218/241/297	11,4				
	KD 6	136,4	2,9	78/126	11,5				
	KD 8	136,6	2,8	190/272	21,75				
	KD 10	136,3	3,4	102	7,4				
	KD 12	136,8	4,95	211/193/ 161/162	25,2				

⁺⁾ Bei mehreren Angaben sind die Bruchkoordinaten verschiedener Einzeldrähte angegeben.

Anlage 20: Standzeiten der Korrosionsprüfung nach der FIP-Richtlinie
(Polyäthylen-Prüfzelle Nr. 2 / Prüfmaschine Nr. 2)